

企画セッション「高エネルギー加速器実験の現在と未来 ～素粒子物理分野と共に考える加速器科学の将来～」

J-PARCにおける 高エネルギー実験の現状と今後

第22回日本加速器学会年会@東京都市大学
2025年8月6日

松原 綱之 (KEK/J-PARC)

ジェイ パーク
J-PARCさん
J-PARC-san

(c) HiggsTan



J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)

- ・ MW級大強度陽子加速器を擁する世界的にもユニークな多目的研究施設
- ・ 日本原子力研究開発機構（JAEA）と高エネルギー加速器研究機構（KEK）が共同で建設・運営



- ・ リニアック・RCS・MRの3つの加速器からなる加速器施設
 - ・ ビーム出力の大強度化によって当初設計を超えるビーム強度を達成
- ・ 素粒子物理学、原子核物理学、物質・生命科学、原子力工学など広範な分野で最先端の研究を展開

高統計・高精度な素粒子実験群

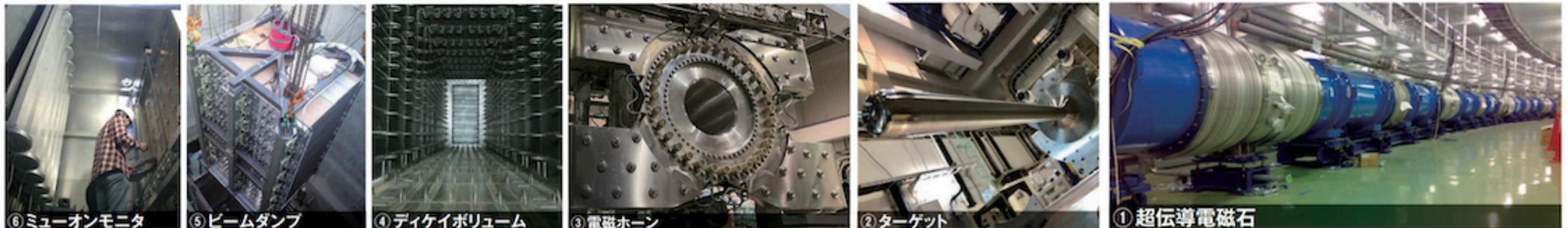
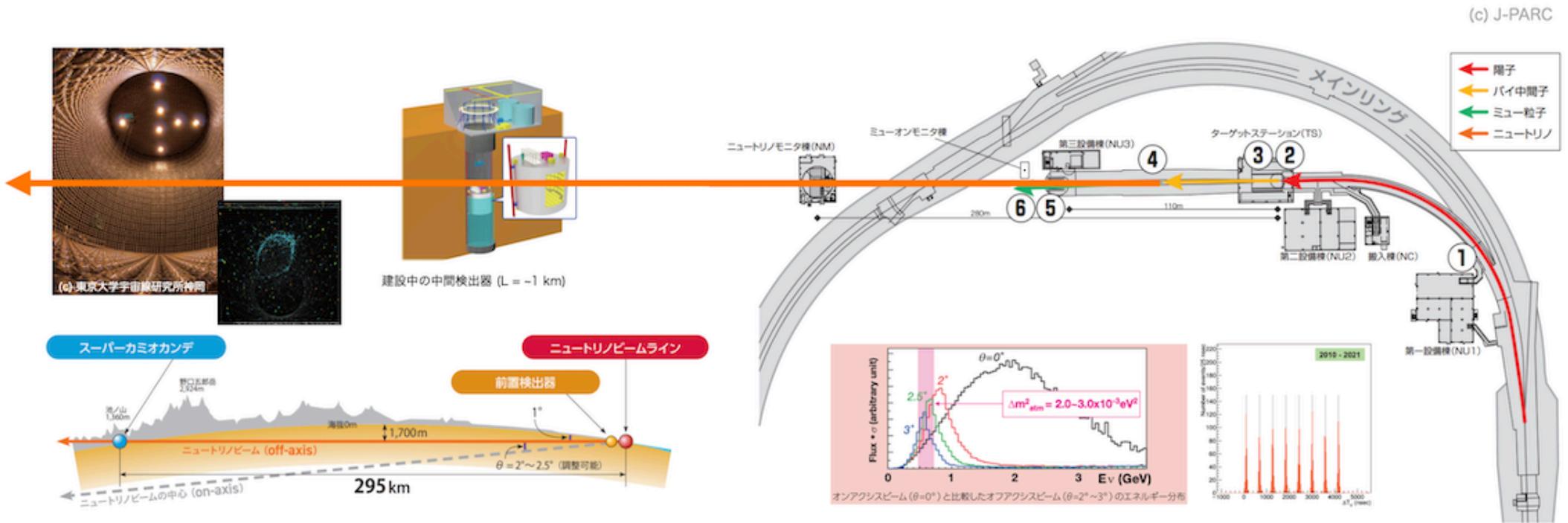
- ・陽子ビームからK中間子・ニュートリノ・ミュオン・中性子などの多彩なビームを作り出し、大強度・高品質なビームを用いた国際的な高エネルギー実験を複数展開



- ・ニュートリノ実験施設・ハドロン実験施設・物質・生命科学実験施設の3つの実験施設で展開している高エネルギー実験の現状と今後について紹介する

ν 実験 @ ニュートリノ実験施設

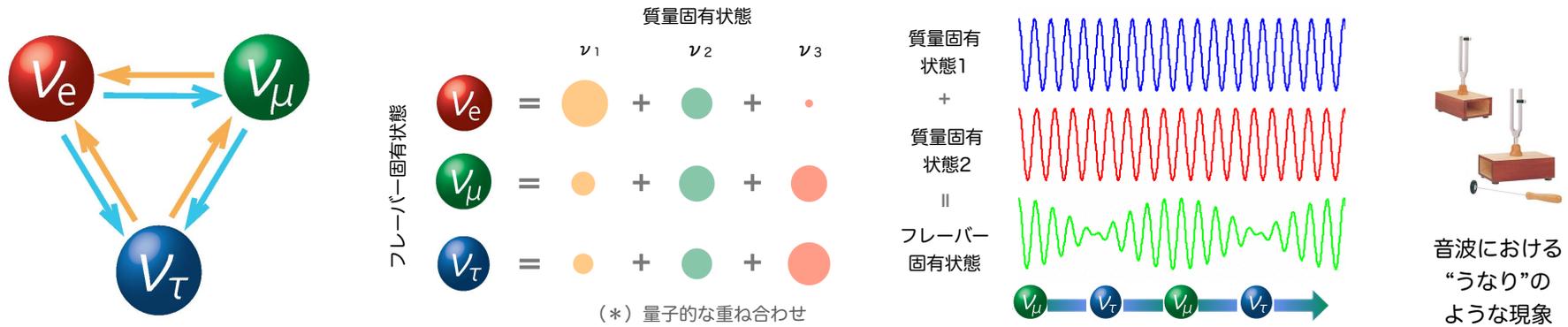
- MRから速い取り出しモード (FX) で陽子を取り出し、超伝導電磁石で神岡方向に曲げ、グラファイト標的に当てて生成した π 中間子等を電磁ホーンで前方方向に収束、その崩壊からパルス状の大強度 $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ ビーム (~ 0.6 GeV) を発射
- 生成直後のニュートリノを前置/中間検出器で測定、295 km離れたSKで観測



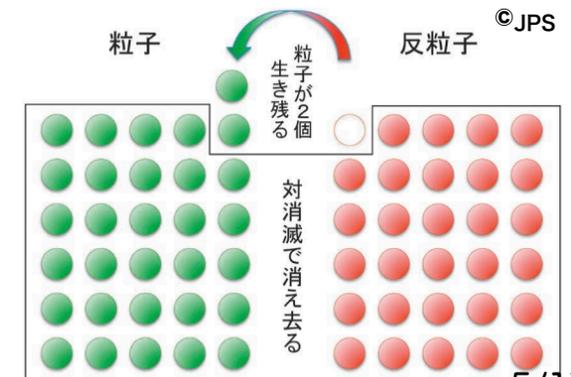
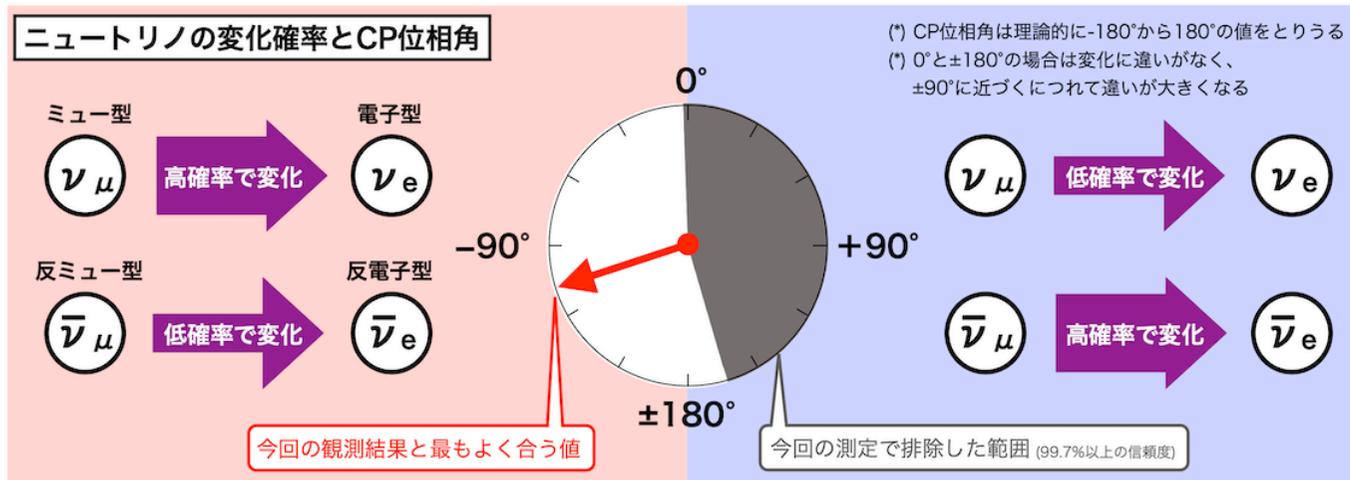
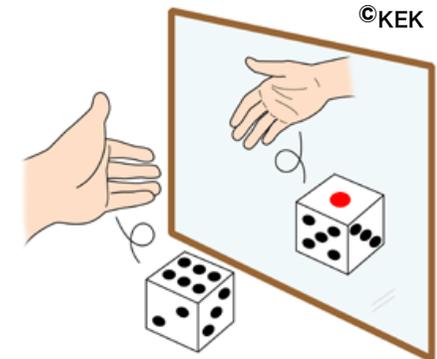
ν 実験：T2K/Hyper-K



- 3種あるニュートリノの種類が飛行中に入れ替わる (存在確率が時間とともに振動する) 現象の「ニュートリノ振動」の性質を詳しく調べる実験



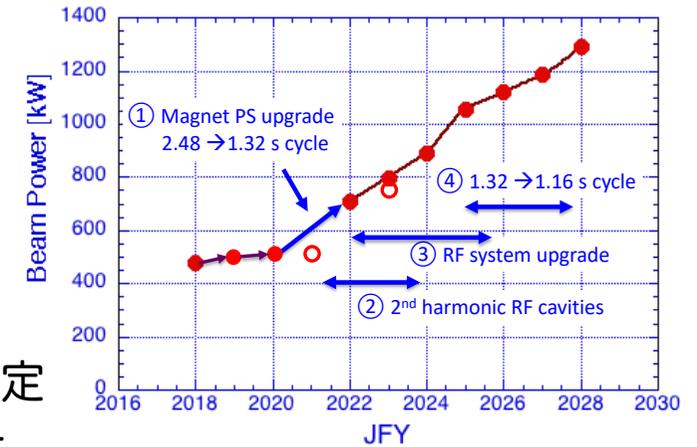
- T2K実験は2009年度から測定開始
- 2013年に世界で初めてミュオン型から電子型へのニュートリノ振動を発見
- 最新結果：90%の信頼度でニュートリノのCP対称性の破れを示唆
 - もし見つければ、クォーク以外で初のCP対称性の破れの発見
 - 宇宙から反物質が消えた謎の解明につながる可能性も



将来

JAHEP将来計画委員会勉強会：オープンセッション「T2K/HK実験」より (<https://kds.kek.jp/event/55391/>)

- 2028年に1.3 MW化の完了とHyper-K検出器の稼働開始を予定
 - MR長期シャットダウン前に比べて、約20倍早く統計増
(高繰り返し化とパルス当たり陽子数増で~2.6倍の強度 × SK比~8倍の有効体積)
- Hyper-K実験は6ヶ月/年の測定を10年間行う計画
 - 米国のLBNF-DUNE実験がライバル。2032年からビーム稼働予定
- その後の次世代プロジェクト移行への明確なビジョンは世界的にもまだコンセンサスがなく、測定と並行して検討が必要な状況
(Hyper-K実験の中でも加速器を用いない物理は少なくとも20年継続。陽子崩壊やニュートリノ天文学など)



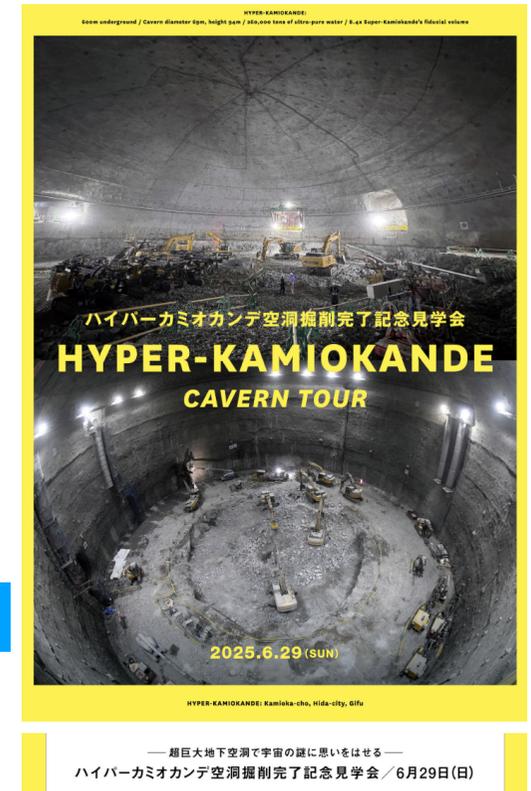
技術的課題

- ビームロス低減・局所化
- ピーク電流低下によるパイルアップ抑制
- 高放射環境下でのメンテナンス性向上
- トリチウム生成量の抑制
- 将来に向けた開発
 - 標的やビーム窓に用いる放射線耐性素材
 - スーパービーム方式でのさらなる大強度化？
 - ニュートリノファクトリやベータビーム等のライバル？

第19回日本加速器学会年会 (2022)
田村文彦 他「J-PARC MR フラットトップにおける非断熱的パンチ操作への縦方向インピーダンスの影響」

第21回日本加速器学会年会 (2024)
大山雄一 他「J-PARCニュートリノビームライン1.3MW運転申請と放射化水処理」

学会誌「加速器」Vol.18, No.4, 2021 (217-224)
中平武、松原綱之「J-PARCニュートリノ生成標的」



K, μ 実験 @ ハドロン施設

- MRから遅い取り出しモード (SX) で陽子を取り出し各ラインに分岐
 - KOTO : Aライン → 金標的 (92 kW達成) → KLビームライン (~2 GeV/c、~ 10^7 K⁰/秒)
 - 金標的で生成された粒子からKL中間子を選別、検出器に導いて稀崩壊を測定
 - COMET : Cライン (~8 GeV/c) → グラファイト/W標的 (56 kW目標) → ミューオン輸送 (≤ 77 MeV/c、~ 10^{11} μ /秒)
 - 大強度・特殊なパルス状ビーム。輸送ソレノイドでビーム由来の背景事象を避ける

(c) J-PARC

Main Ring Synchrotron (メインリングシンクロトロン), Secondary Particle Production Target (T3) (二次粒子生成標的(T3)), Hadron Experiment Hall (ハドロン実験ホール), Beam Dump (ビームダンプ), Hadron Switchyard (ハドロンスイッチヤード), A Line (Aライン), B Line (Bライン), C Line (Cライン), Service Space (サービススペース), Concrete Block (コンクリート鉄ブロック), Proton Beam (陽子ビーム), KL/KS Beam Line (KL/KS ビームライン), Secondary Beam Line (二次ビームライン), KL Beam Line (KL ビームライン), Large Vacuum Chamber (大型真空室), Secondary Particle Production Target (T3) (二次粒子生成標的(T3)).

KOTO: Gamma-ray detector (ガンマ線検出器), Neutron detector (中性子検出器), Muon detector (ミューオン検出器), Beam particle detector (ビーム中粒子検出器), Two-target system (二つのボンヤリ), Magnetic calorimeter (電磁力ロリメータ), Neutron detector (中性子検出器), Secondary neutron (二次ニュートロン).

COMET: High-energy secondary production target (ハイ中間子生成標的), Electron beam (電子ビーム), Muon production target (ミューオン生成標的), Muon stopper (ミューオン停止磁石), Electron transfer magnet (電子移送磁石), High-energy secondary target (ハイ中間子標的磁石), Beam particle detector (ビーム中粒子検出器), Electron detector (電子検出器), Muon detector (ミューオン検出器).

50 kW標的 (2014-2019年)

95 kW標的 (115 kW @ 4.2 sec)

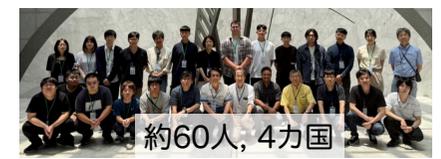
現在運転中

150 kW回転標的 (開発中)

<https://j-parc.jp/c/facilities/nuclear-and-particle-physics/hadron.html>

7/17

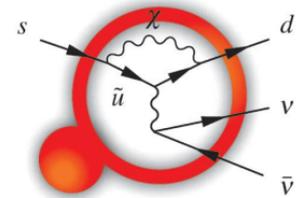
K実験：KOTO



JAHEP将来計画委員会勉強会：オープンセッション「KOTO/KOTO-II実験」より (<https://kds.kek.jp/event/55395/>)

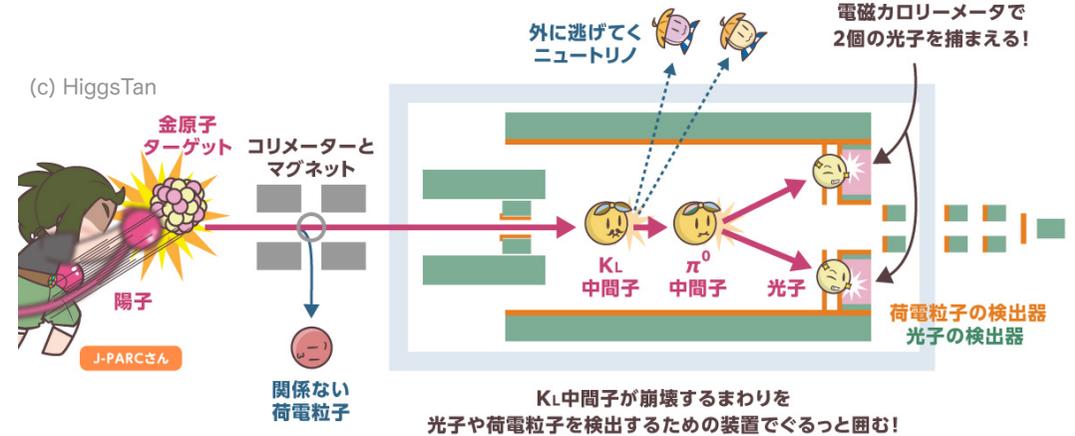
・ K中間子の稀崩壊 ($K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$) 探索実験

- ・ クォークのCP対称性を破る超レアな崩壊：崩壊分岐比 = $(2.49 \pm 0.39) \times 10^{-11}$
- ・ 標準模型の枠組みで高精度 (< 2%) に理論値を計算可能 → 新物理に敏感

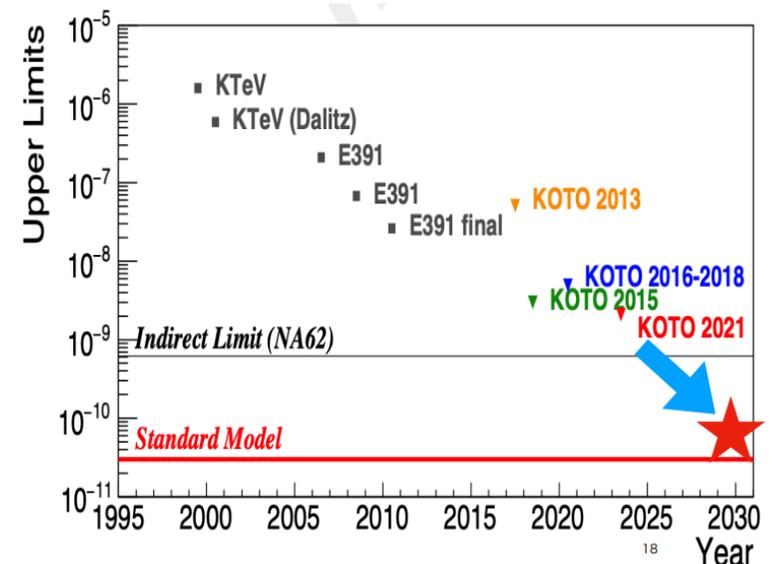


・ ペンシルビーム法

- ・ 大強度でK中間子を大量に生成 (KEK PSの100倍)
- ・ 高品質なビーム (ハリハリビームは不都合)
- ・ π^0 中間子から生じる2光子の高精度測定
- ・ Veto強化 (中性子や荷電K中間子などのBGを削減)



- ・ 2015年4月より本格的なデータ収集を開始
- ・ 最新結果：2021年までの蓄積データにより、崩壊分岐比 $< 2.2 \times 10^{-9}$ (90%信頼度) の上限値 → 直接測定として世界最高感度
- ・ あと4~5年の測定で $< 10^{-10}$ を上回る感度で探索する計画
- ・ 国際情勢：CERNは昨年にKaon実験を次期計画に選ばず
今後、日本が世界唯一の施設に
- ・ 発見と分岐比精密測定を目指すKOTO IIの提案

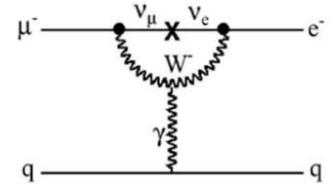


μ実験：COMET

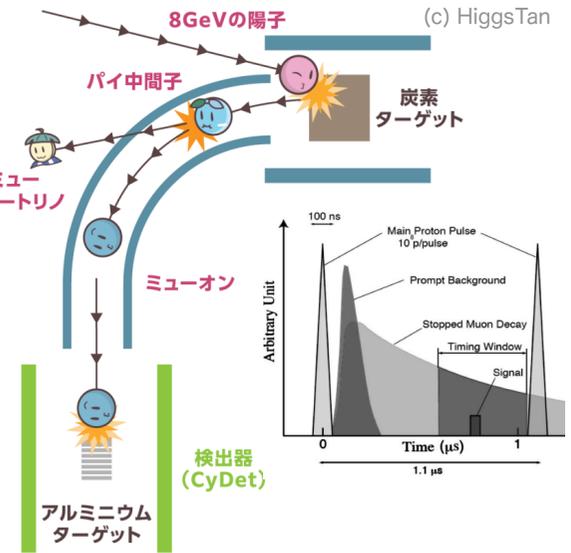
JAHEP将来計画委員会勉強会：オープンセッション「COMET実験」より (<https://kds.kek.jp/event/55397/>)



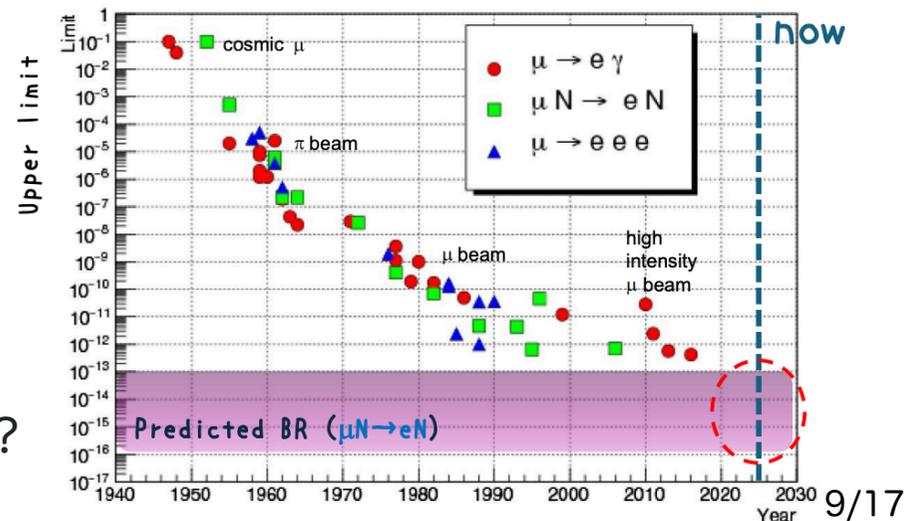
- ・ ミューオン電子転換 ($\mu N \rightarrow eN$) 事象探索実験
 - ・ 原子核に捉えられたミューオンがニュートリノを放出せずに電子に転換する未発見の「荷電レプトンフレーバー非保存」を探索
 - ・ 標準模型では強く制限 (分岐比 $\sim 10^{-54}$)。一方、標準模型を超えた枠組みの理論では測定可能な範囲 (分岐比 $\sim 10^{-15}$) に予想 → 見つければ新物理



- ・ 特殊なパルス状の大強度ビームが必要 (MR 9バケットのうち4つを使用して約1 μs間隔)
 - ・ Extinction (パルス間/内残存陽子数比) $< 10^{-10}$ という厳しい要求
- ・ 高い運動量分解能を持つ検出器 (200 keV/c以下@105 MeV)
- ・ 目標感度： 10^{-14} @ Phase-I (3.2 kWビーム強度)、 10^{-16} @ Phase-II (56 kWビーム強度)
 - ・ 現在の上限値は 7×10^{-13} (90%信頼度) by SINDRUM実験 @ PSI
 - ・ 米国のMu2e実験がライバル



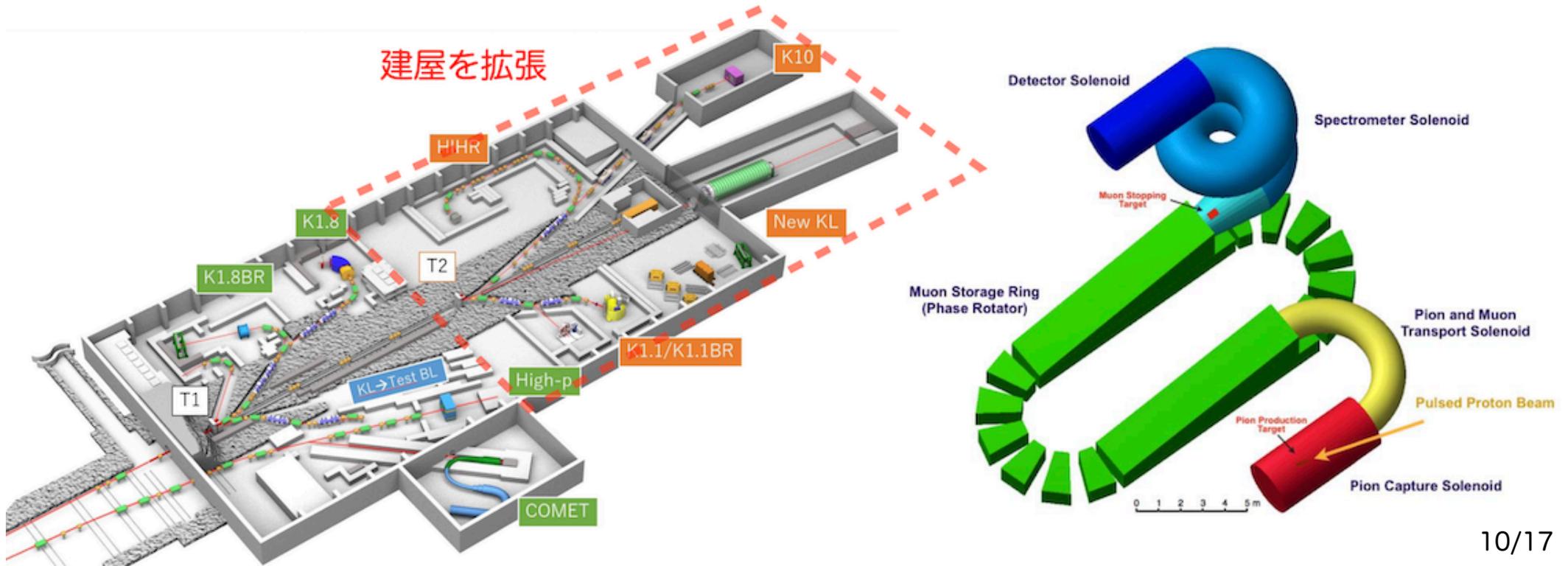
- ・ 現状
 - ・ 2023年にビームコミッショニング (Phase-α)
 - ・ ミューオンビームの検出器エリアへの輸送に成功
 - ・ 2024年に捕獲ソレノイドを設置開始
 - ・ 2027年にPhase-Iを開始予定。Phase IIは2031年~?



将来

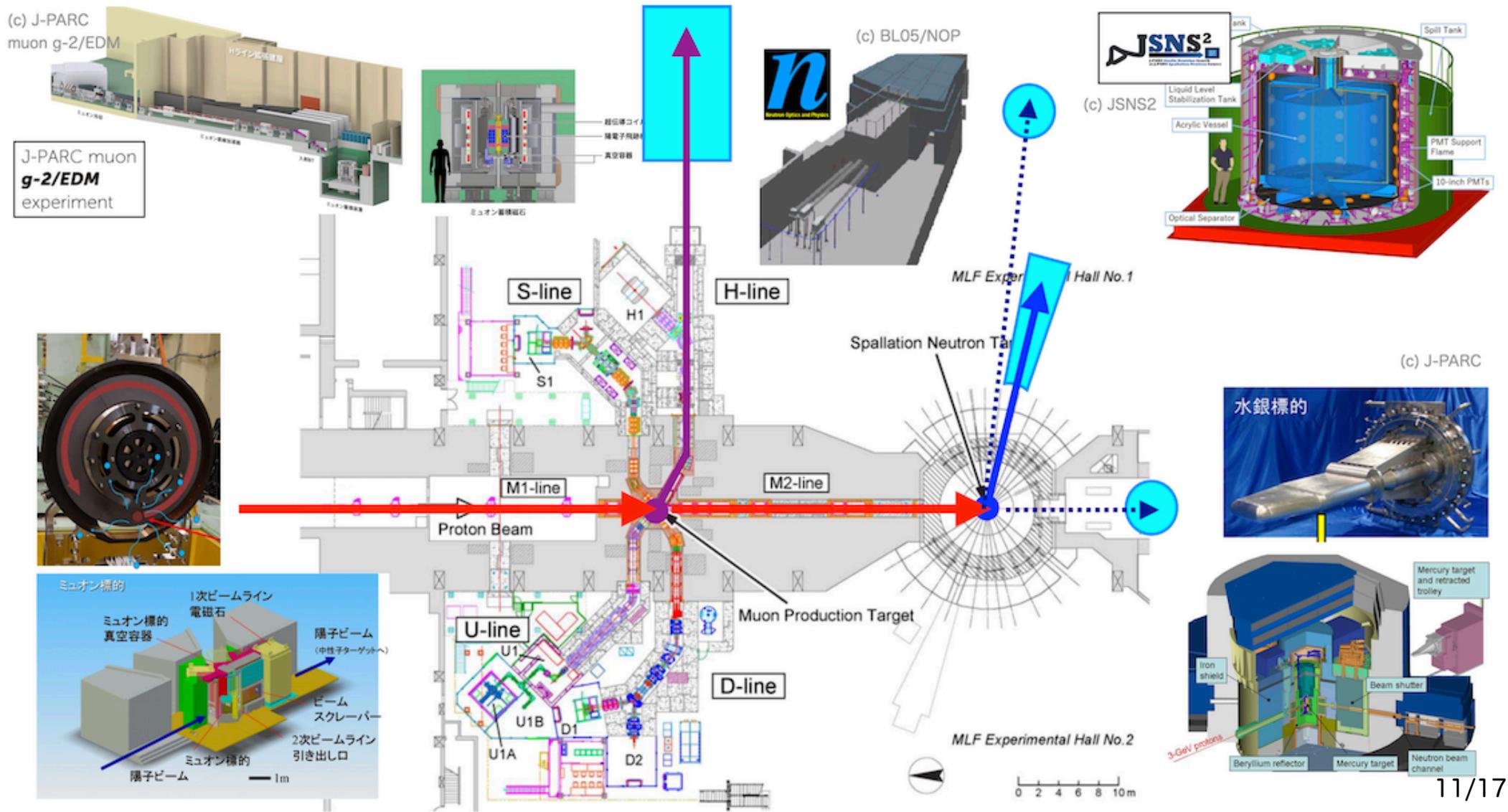
JAHEP将来計画委員会勉強会：オープンセッション「KOTO/KOTO-II実験」より (<https://kds.kek.jp/event/55395/>)
JAHEP将来計画委員会勉強会：オープンセッション「COMET実験」より (<https://kds.kek.jp/event/55397/>)

- KOTO IIが中核研究の一つとなっているハドロン拡張計画
 - ビーム取り出し角度を最適化 (16度から5度に) した大強度KLビームでKOTOの100倍の感度
 - KEK-PIP2022で優先順位1位となったが、予算獲得が厳しい状況。ステージング案等を議論中
- COMET実験は別途、Phase-III・PRISM/PRIME ($<10^{-18}$) の計画
 - まずはPhase-Iを開始する必要。Phase-IIも実現に向けて予算が必要な状況
 - ターゲット・粒子捕獲・輸送の開発が鍵。ビーム診断技術が必要不可欠



μ , n , ν 実験 @ MLF

- RCSから出射した陽子ビームをMLFに輸送し、ミュオン回転標的・水銀標的に当て粒子を生成
- J-PARC muon g-2: ミュオン標的で生成したミュオンを冷却・加速し実験エリアに
- BL05: 水銀標的で生成した中性子を用いた、様々な中性子基礎物理実験
- JSNS2-II: 水銀標的で大量に発生するニュートリノを利用して未知のニュートリノ探索



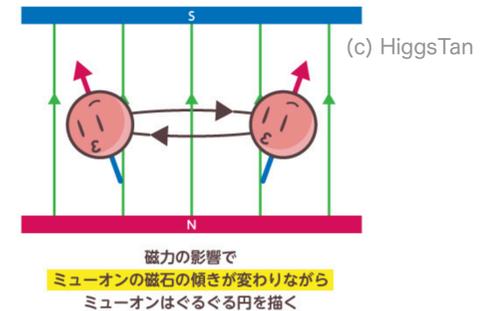
μ実験：muon g-2



約120人, 11カ国

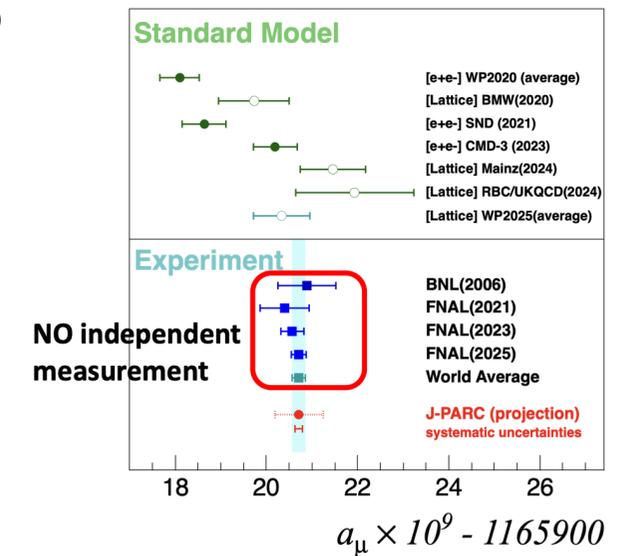
JAHEP将来計画委員会勉強会：オープンセッション「g-2実験/Muon加速」より (<https://kds.kek.jp/event/55396/>)

- ・異常磁気能率 (g-2)：素粒子のスピンに起因する磁石としての大きさの量子補正による2からのずれ
- ・標準模型の枠組みで高精度に計算された理論値と測定値を比較
 - ・ ミューオンは電子より新物理の効果が約4万倍 → 違いがあれば新物理



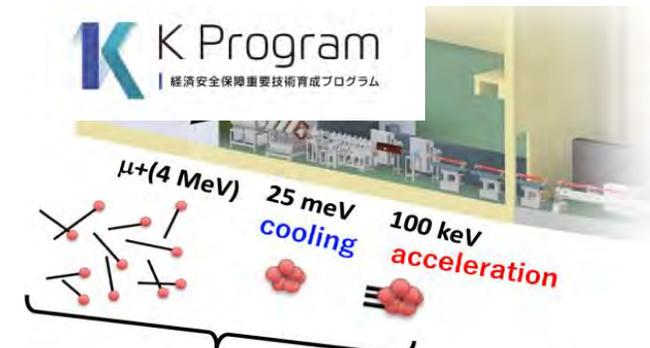
- ・ 先行実験：FNAL g-2実験
 - ・ 従来の電場を用いたストレージリング手法での測定精度を限界まで高めた
 - ・ 今年6月に139 ppb ($a_{\mu} = (1165920710 \pm 162) \times 10^{-12}$) という世界最高精度の測定結果を出して実験を完了
 - ・ ただし、理論予測が一貫しておらず、新物理かどうかは結論出せず

(電子・陽電子衝突実験のデータに基づく計算値 vs 格子QCDの計算値)



- ・ 低エミッタンスミュオンビームを蓄積する世界初の手法で測定
 - ・ 世界初のミュオン冷却&加速施設
 - ・ ミューオニウム負イオンを經由して μ^+ を冷やす

- ・ 2018年にミュオニウム負イオンの加速に成功
- ・ 2024年に世界初のミュオン冷却・加速の実証に成功
- ・ 装置を段階的に整備し、2030年にPhase I開始 (460 ppb)
- ・ 将来的にPhase IIで100 ppbを目指す提案も



n実験：BL05での中性子基礎物理

中性子寿命測定：約30人
 中性子干渉計：約10人
 NOPTREX：約130人

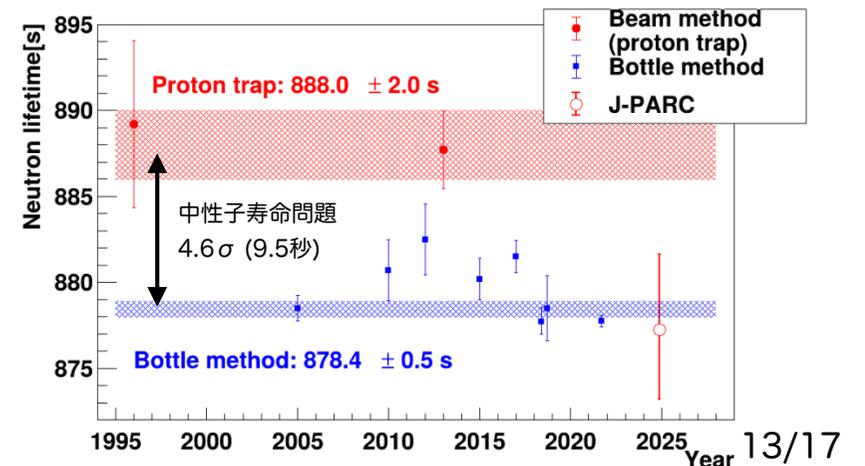
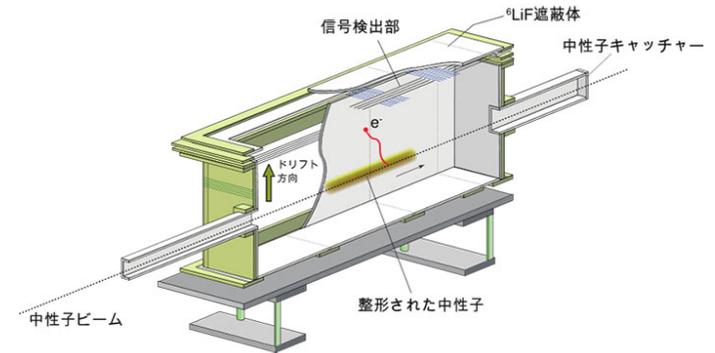
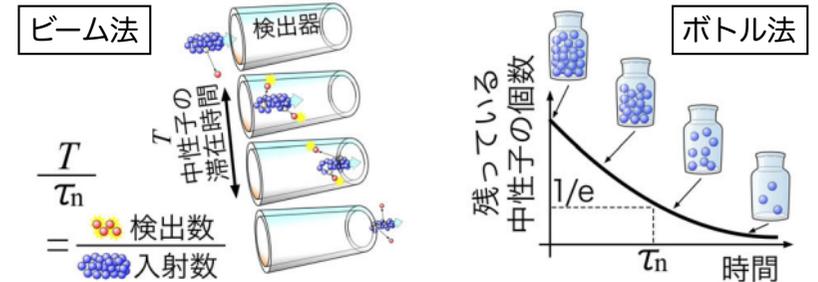
JAHEP将来計画委員会勉強会：オープンセッション「中性子実験」より (<https://kds.kek.jp/event/55397/>)

- 中性子寿命問題：原子核を構成する核子。自由中性子は寿命約15分で β 崩壊 ($n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$)
 ビーム法 (崩壊) とボトル法 (消失) の異なる手法で測定結果で 4.6σ (9.5秒) の違い
 → 実験上の誤りか、両方が正しければ新物理の示唆か

- BL05では電子を検出する新しいビーム法 (従来は陽子を検出)
 - 冷中性子ビーム (20 meV) を40 cm程度の短いバンチに整形
 - 1 m長のガス検出器に導入し、電子線を検出
 → パルスビームにより高S/N比で測定

- 2009年から測定開始。2016年から安定したデータ収集
- 2025年の結果では、 $\tau = 877.2^{+4.4}_{-4.0}$ 秒の結果
- 今後、ソレノイド磁場+マルチレイヤーTPCでバックグラウンドを抑制し、精度1秒での測定を目指す

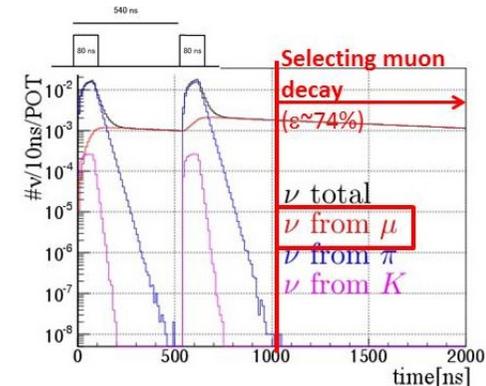
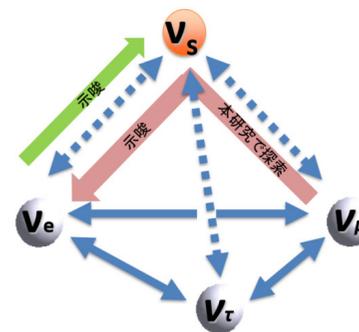
- その他、BL05での中性子基礎物理
 - 新型中性子干渉計を用いた研究
 - 未知の相互作用の探索実験への応用など
 - 計画中の偏極中性子と偏極原子核を用いた時間反転対称性の破れ探索実験 (NOPTREX)



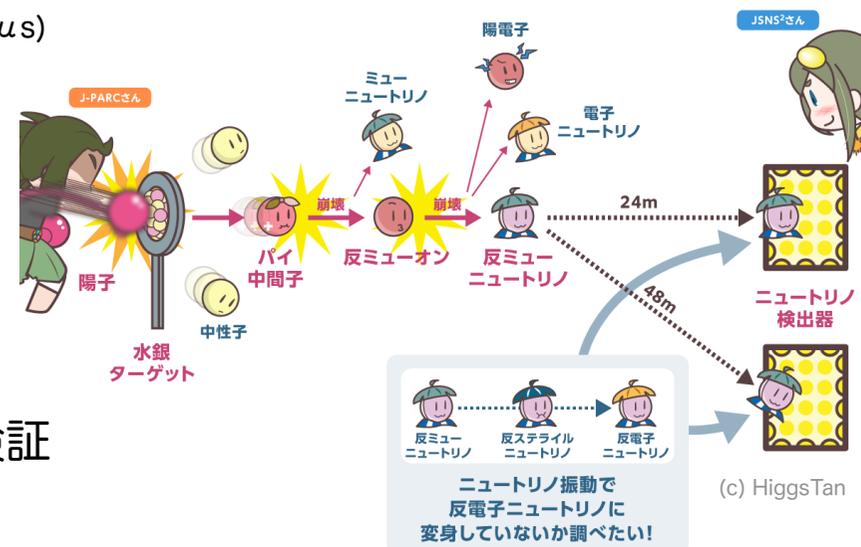
ν 実験 : JSNS²-II



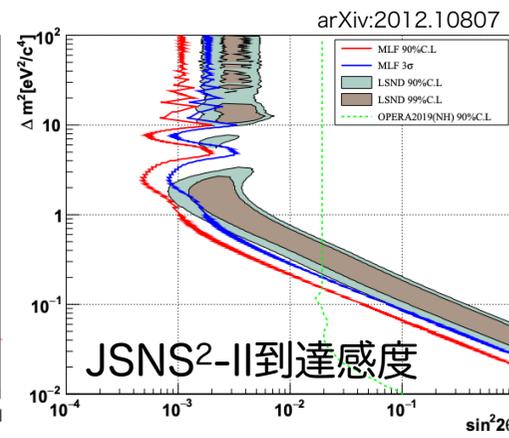
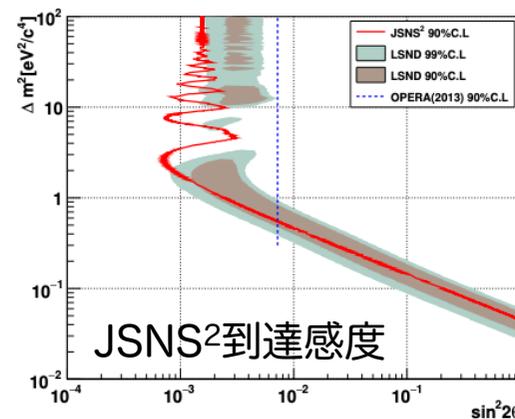
- ステライルニュートリノ探索実験
 - ν_s : 弱い相互作用すらしない仮説上のニュートリノ
 - 複数の実験でその存在を示唆も、決定的な証拠なし
 - 見つければ新物理。暗黒物質の候補の一つ



- 静止μ崩壊からのニュートリノを使用 ($\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$, $\tau = 2.2\mu s$)
 - $\bar{\nu}_\mu$ から振動する $\bar{\nu}_e$ を逆β崩壊で観測
- 先行実験 : 米国・LSND実験と同じコンセプト
 - MLFの大強度・短パルスビームで高統計かつ高S/N
 - Gdシンチレータで高効率に観測
 - 良いエネルギー分解能で振動パターンの解析も可
 - 結果が広く受け入れられていないLSND実験の完全な検証



- ステージングで実験が進行中
 - 基線長さ24 mと48 mの2基の検出器
 - 2021-2024年に検出器1基での物理ラン
 - データ解析が進行中
 - 2基目が完成。今後2基での測定を開始



将来

JAHEP将来計画委員会勉強会：オープンセッション「g-2実験/Muon加速」より (<https://kds.kek.jp/event/55396/>)
 JAHEP将来計画委員会勉強会：オープンセッション「中性子実験」より (<https://kds.kek.jp/event/55397/>)

MLF第2ターゲットステーション計画 (1 + 0.5 MW)

- ・中性子源とミュオン源を一体化
 - ・中性子：20倍以上の輝度 (標的10倍 x デバイス2倍)
 - ・ミュオン：50~100倍の強度 (標的10倍 x 捕獲ソレノイド 5~10倍)
- ・高エネルギー実験とはまだ強く結びついていなさそう

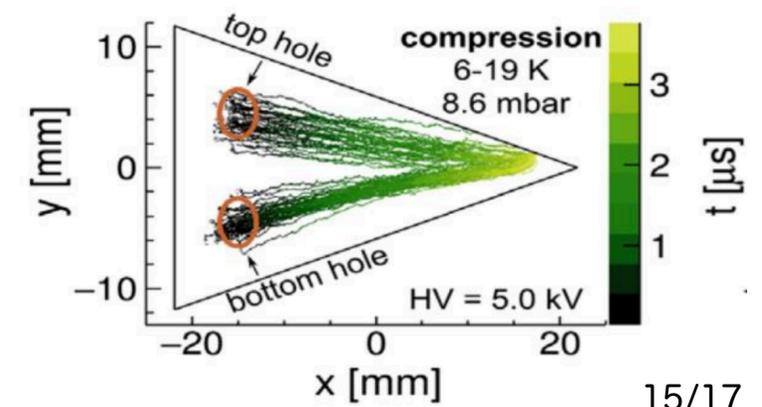
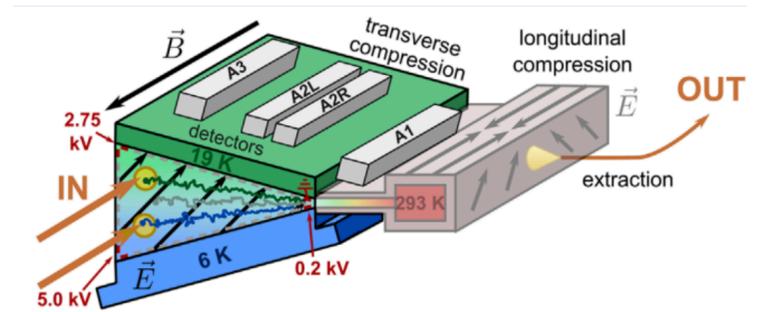
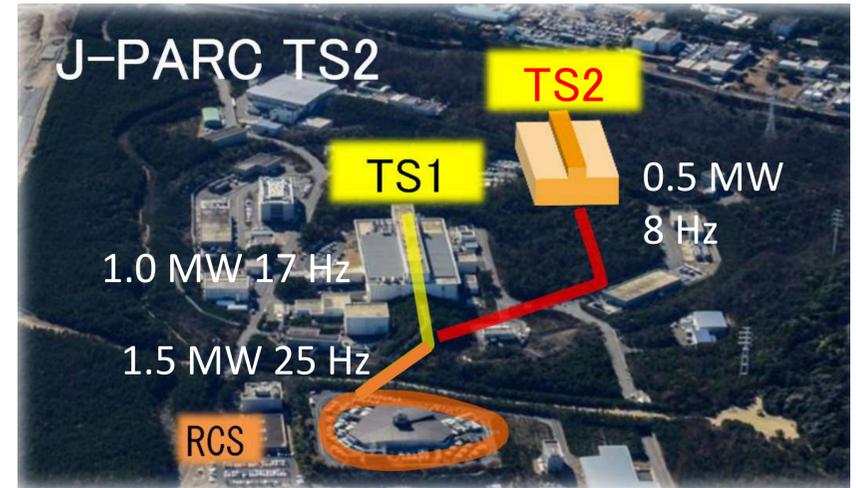
ミュオン冷却・加速技術の将来

- ・将来のg-2実験
- ・ミュオンコライダー
- ・ニュートリノファクトリー

冷却技術 (寿命が短いので確率冷却や電子ビーム冷却は不可)

- ・ミュオニウムを介した冷却 (g-2 @ J-PARC) ... μ^+ のみ。
- ・イオン化冷却 (MICE @ RAL) ... 横方向冷却のみ実証
- ・密度勾配を付けたガス中で冷却 (MuCool @ PSI) ... 進行中

Collaboration	Particle	Primary beam	Intensity	Transverse emittance	Longitudinal emittance	Energy
J-PARC	μ^+	28MeV/c $\Delta p/p \sim 5\%$ $10^8/s$	$10^5 \mu/s$	1π mm mrad	0.01 mm	212MeV
IMCC	μ^+ / μ^-	~ 250 MeV/c, $\Delta p/p \sim O(10)\%$ $10^{13}/s$??	$10^{12} \mu/s$	30 mm mrad	100 mm	>TeV
MuCool	μ^+	28MeV/c, $\Delta p/p \sim 5\%$ $10^{10}/s$ (HIMB)	$10^6 \mu/s$	Aiming 10^{10} reduction of phase-space volume		??



J-PARC全体の課題と将来への取り組み

リソースの課題：電気代・運転時間

- ・ 加速器のグリーン化
 - ・ 実現例①：ニュートリノビームラインの超伝導電磁石 ~ 消費電力が2割に
 - ・ 実現例②：金属磁性体コアを開発してRFシステムに導入 ~ 消費電力が半分に
 - ・ 実現例③：MR新電源 ~ 電力10%増でビームパワー2倍
- ・ ビームタイムのシェア
 - ・ ストレッチャーリング案：“MR (FX) → NU (FX)” & “SR (FX) → HD(SX)”
(長期シャットダウンを伴う場合、短期的にはデメリットが大きい)

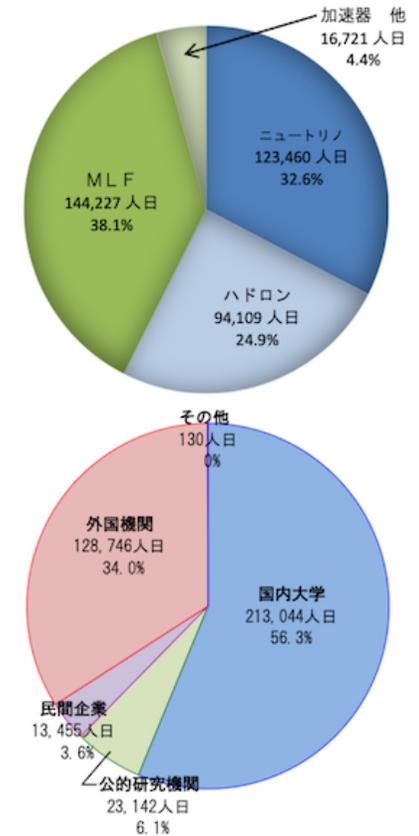
物理・施設・技術の課題：次世代プロジェクトに移行するビジョンの確立・発展

- ・ J-PARCではおおよそ年一回の内部ワークショップを開催して将来計画を議論
 - ・ 2024/10/14-18 J-PARCシンポジウム 2024 (<https://j-parc.jp/symposium/j-parc2024/>)
 - ・ 2024/3/27 第二回 将来について考えよう (<https://kds.kek.jp/event/50046/>)
 - ・ 2023/3/31, 4/10 第一回 将来について考えよう (<https://kds.kek.jp/event/45982/>)
 - ・ 2019/9/24-26 J-PARCシンポジウム 2019 (<https://j-parc.jp/symposium/j-parc2019/>)
 - ・ 2019/1/7 学術会議マスタープラン2020に向けた検討会 (<https://kds.kek.jp/indico/event/29990/>)
 - ・ 2018/4/23 J-PARC大型将来計画検討会 (<https://kds.kek.jp/indico/event/27576/>)
 - ・ 2016/1/5 J-PARC 大型計画の説明会 (<https://kds.kek.jp/indico/event/20531/>)
 - ・ 2014/7/12-15 J-PARCシンポジウム 2014 (<https://j-parc.jp/symposium/j-parc2014/>)

終わりに

- ・ J-PARCでは、世界に誇る大強度・高品質なビームを用いて、学術的にインパクトの大きい最先端の素粒子実験を複数展開
- ・ 国際的にも注目度が高く、世界中から多くの研究者が集い、実験への直接的な貢献や技術交流などの国際協力も進行中
- ・ 将来計画の議論も盛んに行っており、加速器と素粒子の研究者が力を合わせて、より一層と魅力的な成果を生み出す未来に期待

2008年12月以降のユーザー
来訪者数 (人・日) と割合



https://www.mext.go.jp/content/20231102-mxt_kibanen01-000032468_5.pdf

